

考虑水分再分布的沟灌入渗模拟与春小麦 垄作沟灌合理垄宽

张新民¹, 张吉孝², 单鱼洋¹

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 7300201; 2. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 垄作沟灌技术具有显著的节水增产作用,但在春小麦种植中应用尚缺乏参数设计方面的理论支撑。本研究采用粉砂质粘壤土与粘土两种典型土壤实测水分运动参数和 HYDRUS 软件,模拟了梯形灌水沟不同垄宽情况下的土壤水分运动和停水后水分再分布,研究了不同灌水量时湿润锋推进过程和水分再分布后的湿润体变化,分析了设计灌水定额下适宜作物生长湿润体范围,提出了粉砂质粘壤土和粘土宜采用的合理垄宽为 20~50 cm 和 20~35 cm,这一结果为干旱区春小麦垄作沟灌技术推广提供了技术支撑。

关键词: 沟灌;入渗模拟;土壤水分再分布;合理垄宽

中图分类号: S275.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)02-0201-05

Infiltration simulation of furrow irrigation under water redistribution and rational ridge width of furrow irrigation for spring wheat

ZHANG Xin-min¹, ZHANG Ji-xiao², SHAN Yu-yang¹

(1. Gansu Research Institute for Soil and Water Conservation, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Ridge tillage with furrow irrigation technology possess a significant role of water saving and increasing yield, but lack the theory support for application in spring wheat planting. In this research, adopted two typical soils as silt sandy clay loam and clay, measured the soil water moving parameters and using the HYDRUS software, have simulated the soil water movement and water redistribute after stop water supply under the different ridge width of trapezoidal furrow; have researched the advancing process of wetting front and wetting body change with water redistribute under different irrigation volume, have analyzed the range of wetting body for suitable plant growth under the design irrigation quota, also have put forward the rational width as 20 to 50 cm and 20 to 35 cm for the silt sandy clay loam and clay soil respectively. This result can be provided the technical support for extending the ridge tillage with furrow irrigation technology of spring wheat in arid areas.

Keywords: Furrow irrigation; infiltration simulation; redistribution of soil water; rational ridge width

小麦垄作栽培技术将传统平作的平面型田面改为波浪型,扩大了土壤表面积,光能利用率提高,有利于延缓植株衰老,延长叶片功能期,增加了植株抗倒伏能力,小麦抗病性能增强,产量显著提高。垄作沟灌技术采取垄上种植,沟灌灌溉方式,由于小麦自身生长所需土壤水分由灌水沟内的水分向垄体侧渗供给,因此,在同等肥力和灌水量条件下,垄作栽培的效果与垄的方向、小麦种植密度以及灌水质量密切相关,而灌水质量又受垄沟参数(沟深、沟宽、垄

宽)的影响。王旭清、林同保对北方湿润地区小麦垄作沟灌参数进行了初步研究^[1,3],边金霞对河西内陆区春小麦垄作沟灌参数进行了初步研究^[2]。甘肃农业大学对春小麦固定道耕作结合垄作沟灌技术在西北地区的应用进行了研究,分析了传统耕作与固定道耕作灌溉水侧渗、水分下渗动态,固定道垄体土壤含水率表现出明显的不均匀分布,灌溉后水分不能渗透到垄体中部^[4]。张永久^[5]研究了河西内陆区春小麦垄作沟灌的灌溉制度和垄沟参数(垄宽、

收稿日期:2013-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51169002)

作者简介:张新民(1965—)男,正高级工程师,主要从事水文与农业水土资源方面研究。E-mail: xzmzhs@yahoo.com.cn。

表 1 土壤的物理性质
Table 1 Physical character of soil

| 土壤容重 Bulk density /(g·cm ⁻³) | 各级颗粒质量百分数 Weight percentage of soil particle/% | | | 土壤质地 Soil texture |
|--|--|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | 黏粒(d < 0.002 mm) Clay | 粉粒(0.02 mm > d ≥ 0.002 mm) Silt | 砂粒(d ≥ 0.02 mm) Sand | |
| 1.45 | 38.41 | 11.79 | 49.81 | 砂质粘壤土 Sandy clay loam |
| 1.40 | 56.75 | 11.4 | 31.85 | 粘土 Clay |

表 2 实例土壤特征含水量
Table 2 The soil characteristic water content in case study

| 土壤 Soil | 田间持水量(重量) Field moisture capacity(weight) /% | 田间持水量(体积) Field moisture capacity(volume) /(cm ³ ·cm ⁻³) | 55% 体积 田间持水量 55% field moisture capacity /(cm ³ ·cm ⁻³) | 65% 体积 田间持水量 65% field moisture capacity /(cm ³ ·cm ⁻³) | 80% 体积 田间持水量 80% field moisture capacity /(cm ³ ·cm ⁻³) | 95% 体积 田间持水量 95% field moisture capacity /(cm ³ ·cm ⁻³) |
|--------------------------|---|--|--|--|--|--|
| 砂质粘壤土 Sandy clay loam | 0.222 | 0.322 | 0.177 | 0.209 | 0.258 | 0.306 |
| 粘土 Clay | 0.266 | 0.372 | 0.205 | 0.242 | 0.298 | 0.354 |

水分特征曲线选用 VG 模型, 模型的表达式如下:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

式中, $K(S_e)$ 为土壤非饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); K_s 为土壤饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); S_e 为土壤相对饱和度; l 为经验拟合参数, 通常取平均值 0.5; $\theta(h)$ 土

壤体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 压力水头(cm); θ_r 为土壤剩余体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s 土壤饱和和体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); α (cm^{-1}) 和 n (-) 是经验拟合参数(或曲线性状参数); 而 $m = 1 - 1/n$ 。根据模型模拟需要, 用美国 SEC 公司生产的 1500F1 型 15Bar 压力膜仪测定土壤水分特征曲线 $\theta(h)$, 用中科院南京土壤物理研究所研制的非饱和导水率测定仪(FS-1)测定土壤导水率 K_s , 从而获得模型中的各参数。结果见表 3。

表 3 土壤水分运动 VG 模型参数表
Table 3 VG model parameters of soil water movement

| 土壤类型 Soil texture | γ_d /(g·cm ⁻³) | θ_r /(cm ³ ·cm ⁻³) | θ_s /(cm ³ ·cm ⁻³) | α/cm^{-1} | n | K_s /(cm·min ⁻¹) |
|-----------------------|--------------------------------------|---|---|-------------------------|-------|-----------------------------------|
| 砂质粘壤土 Sandy clay loam | 1.45 | 0.0580 | 0.47 | 0.0300 | 1.457 | 0.0305 |
| 粘土 Clay | 1.40 | 0.0640 | 0.45 | 0.0346 | 1.228 | 0.0033 |

2.2 模拟计算

根据研究区土壤性质、农机具情况和地方种植习惯, 确定对梯形灌水沟灌溉入渗与水分再分布进行模拟, 假定模拟土壤为均质且各向同性, 垄沟参数为: 沟宽 15 cm, 沟深 15 cm, 垄宽 60 cm, 沟边坡 1:1, 沟中水深 13.5 cm。

灌溉入渗模拟初始含水量按作物生长适宜最低含水量确定, 砂质粘壤土 $0.177 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 粘土 $0.205 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。单元划分由计算机自动生成, 模拟初始与最小时间步长均为 0.05 min, 含水量与吸力公差分别为 $0.001 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0.1 cm 水柱, 最大迭代次数 30, 模拟时间砂质粘壤土为 780 min, 粘土为 5 000 min。

再分布模拟初始条件为灌水停止时刻的实际水分剖面, 单元剖分与模拟步长、公差等与灌溉入渗模拟时相同。

3 结果分析

3.1 不同灌水量下湿润锋推进过程

沟灌土壤水分入渗分为两个阶段, 初期为自由入渗, 湿润体为半球体, 但随着入渗时间增长, 相邻两沟水平向湿润锋发生交汇, 入渗逐渐由二维入渗变为竖向一维入渗。沟灌土壤水分入渗湿润锋推进与垄沟参数、土壤性质等有关, 在相同垄沟参数和入渗水量情况下, 不同性质土壤的湿润球体的形状存在差别, 因而湿润推进过程也有较大差异。为了分

析其影响,利用模拟结果绘制两种土壤在垄沟参数相同情况下水平湿润锋推进过程、竖直湿润锋推进过程与入渗量的关系见图 2、图 3。

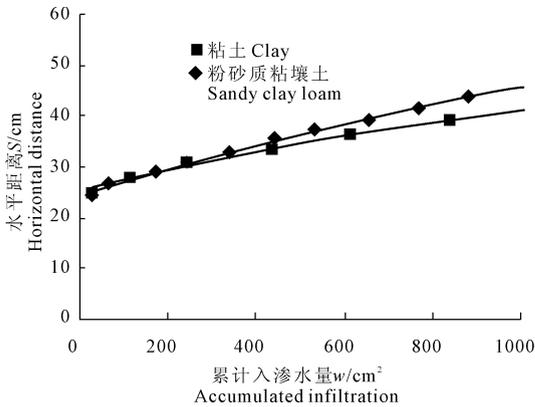


图 2 不同土壤水平向湿润锋推进过程线

Fig.2 Advance process of wet front in horizontal for different soil

由图看出,相同垄沟参数情况下,由于粉砂质粘壤土水平向扩散性能优于粘土,相同入渗量下其水平向湿润锋推进要快于粘土,但竖向湿润锋推进速度恰恰相反。

3.2 土壤水分再分布湿润体变化

根据土壤水动力学相关理论,土壤水分始终处

于运动状态。因此沟灌灌水停止后,入渗停止,但土壤内部水分运动并未停止,停水时的水分剖面将发生改变,此即停水后土壤水分再分布。土壤水分再分布主要由土壤性质、边界条件等决定,表 4、表 5 为不同灌水量情况下两种土壤水分再分布前后湿润体的对比,其中再分布开始时间为灌水停止时间,研究结束时间为湿润体中最大含水量降至田间持水量时刻。

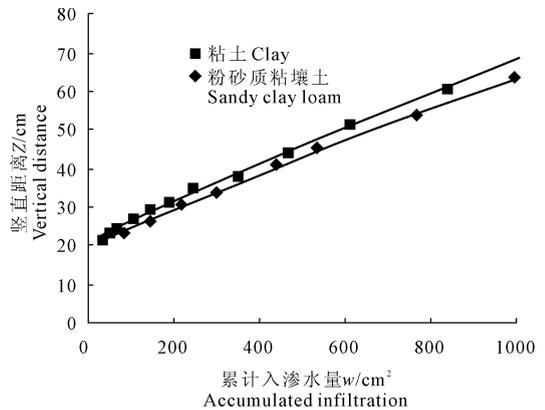


图 3 不同土壤竖向湿润锋推进过程线

Fig.3 Advance process of wet front in vertical for different soil

表 4 砂质粘壤土水分再分布前后湿润锋位置对比表

Table 4 Comparison with the position of wetting front before and after water redistribution for the sandy clay loam soil

| 项目 Item | 灌水量 Water applied w/cm^2 | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 31 | 67 | 172 | 242 | 338 | 439 | 533 | 653 | |
| 再分布时间 Time of redistribution t/min | 30 | 90 | 300 | 420 | 540 | 780 | 900 | 1080 | |
| 水平湿润锋 S/cm Horizontal wetting front | 再分布前 Before redistribution | 24.6 | 26.8 | 28.9 | 31.1 | 33.2 | 35.4 | 37.5 | 39.64 |
| | 再分布后 After redistribution | 40.0 | 41.5 | 43.0 | 46.0 | 48.5 | 50.5 | 51.5 | 52.5 |
| 竖直湿润锋 Z/cm Vertical wetting front | 再分布前 Before redistribution | 21.0 | 22.5 | 29.2 | 31.6 | 35.5 | 41.1 | 45.4 | 50.0 |
| | 再分布后 After redistribution | 23.0 | 28.0 | 37.0 | 41.0 | 48.0 | 56.0 | 60.5 | 68.0 |

对比表 4、5 可以看出,相同灌水量情况下砂质粘壤土灌水停止后水分再分布要快于粘土,其水平与竖向湿润锋的扩张距离也均大于粘土。由于湿润锋处的土壤含水量接近于初始含水量,不足于提供灌水间歇期作物生长的水分需求,因此适宜作物生长湿润体范围应小于湿润锋范围内湿润体。本研究中,适宜生长湿润体范围确定为湿润体内重力水消失时含水量大于 80% 田间持水量 θ_f 的湿润体范围。

3.3 合理垄宽确定

采用沟灌技术,灌水时由于充分利用了土壤水分的水平扩散作用,使得沟的湿润深度小于计划湿润深度,而垄的湿润深度满足计划湿润深度要求,从而降低平均湿润深度。沟灌灌水定额采用(7)式计算。

$$m = 100H(\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (7)$$

式中, m 为净灌水定额 (mm); H 为计划湿润深度 (cm); θ_{\max} 、 θ_{\min} 为适宜土壤含水量上下限 ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)。

表 5 粘土水分再分布前后湿润锋位置对比表

Table 5 Comparison with the position of wetting front before and after water redistribution for the clay soil

| 项目 Item | 灌水量 Water applied w/cm^2 | | | | | | |
|--|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 113 | 243 | 436 | 614 | 838 | 1138 | |
| 再分布时间 Time of redistribution t/min | 720 | 1800 | 3500 | 6000 | 7000 | 8000 | |
| 水平湿润锋 S/cm Horizontal wetting front | 再分布前 Before redistribution | 28.1 | 30.9 | 33.8 | 36.6 | 39.4 | 42.2 |
| | 再分布后 After redistribution | 38.0 | 40.0 | 43.5 | 45.0 | 45.8 | 46.7 |
| 竖直湿润锋 Z/cm Vertical wetting front | 再分布前 Before redistribution | 21.5 | 30.5 | 41.5 | 51.9 | 60.8 | 74.1 |
| | 再分布后 After redistribution | 30.5 | 39.0 | 48.0 | 58.5 | 67.0 | 76.0 |

研究中上下限含水量确定分别考虑调亏情况和充分灌溉情况,调亏灌溉情况适宜土壤含水量上下限 θ_{max} 、 θ_{min} 分别取 $95\%\theta_f$ 、 $55\%\theta_f$,充分灌溉情况适宜土壤含水量上下限 θ_{max} 、 θ_{min} 分别取 $95\%\theta_f$ 、 $65\%\theta_f$,计划湿润深度 H 取 50 cm。两种土壤的设计灌水定额见表 6。

表 6 设计灌水定额表
Table 6 Designed irrigation quota

| 土壤 Soil | 调亏灌溉定额/mm Ration of deficit irrigation | 充分灌溉定额/mm Ration of sufficient irrigation |
|--------------------------|---|--|
| 砂质粘壤土 Sandy clay loam | 48.3 | 64.4 |
| 粘土 Clay | 55.9 | 74.5 |

研究区内小麦生育期合理的灌溉定额分别为 $204 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 和 $236 m^3 \cdot 667m^{-2}$ (4 次充分灌和 1 次调亏灌)。按此分别计算砂质粘壤土不同垄宽情况下灌水量,绘制灌水量与 1/2 沟距的关系,同图绘制湿润锋推进过程线与灌水量关系曲线、水分再分布后水平向适宜水分范围与灌水量关系于图 4。分析图 4 中四条曲线包围的部分,即为合理灌水量情况下 1/2 沟距的适宜范围。在此范围内,灌水定额与垄宽组合可获得较高的横向灌水均匀度和灌溉水利用率,在此范围之外,若灌水定额大而垄宽小,虽横向灌水均匀度较高,但深层渗漏变大,灌溉水利用率降低;若垄宽大而灌水定额相对较小,横向灌水均匀度降低,甚至出现漏灌现象。按图中范围进一步分析便可求得砂质粘壤土合理垄宽取值为 20 ~ 50 cm。同样方法绘制粘土 1/2 沟距与灌水量的关系、湿润锋推进过程线与灌水量、水分再分布后水平向适宜

水分范围与灌水量关系于图 5,分析求得粘土合理垄宽取值为 20 ~ 35 cm。

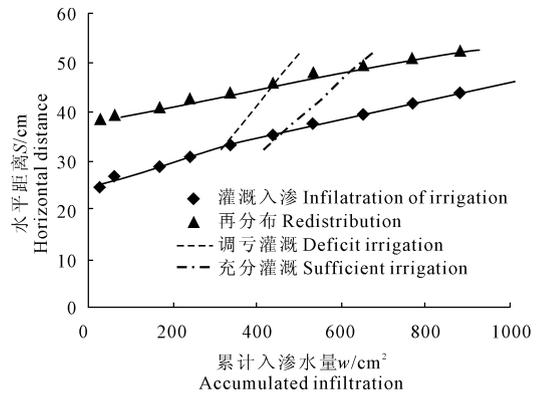


图 4 砂质粘壤土合理垄宽范围分析图

Fig.4 The graphic solution analysis of rational ridge width of sandy clay loam

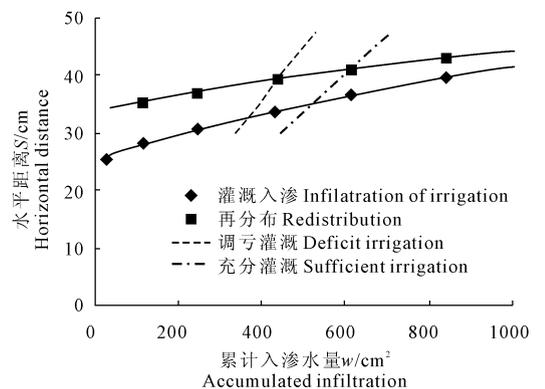


图 5 粘土合理垄宽范围分析图

Fig.5 The graphic solution analysis of rational ridge width of clay

可见,现阶段文峪河梯级水库实行以最小生态流量为基本控制要求的多目标调度是比较切合实际的,一方面生态控制不会过大的影响梯级水库在供水、农灌、发电领域的既得利益,同时又可对灌水量和梯级发电量产生正面的影响。

参考文献:

- [1] Boulton A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 469-479.
- [2] Bednarek A T. Undamming rivers: A review of the ecological impacts of dam removal[J]. *Environmental Management*, 2001, 27(6): 803-814.
- [3] Nakayama M. Post-project review of environmental impact assessment for saguling dam for involuntary resettlement[J]. *International Journal of Water Resources*, 1998, (14): 217-290.
- [4] 张洪波. 黄河干流生态水文效应与生态调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [5] Tortajada C. Environmental impact assessment of water projects in Mexico[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2000, (16): 73-87.
- [6] Richter B D, Baumgartner J V, Power H J. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.

- [7] Richter B D, Warner A T, Meyer J L, et al. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations [J]. *River research and Applications*, 2006, (22): 297-318.
- [8] 陈启慧, 夏自强, 郝振纯, 等. 计算生态需水的 RVA 法及其应用 [J]. *水资源保护*, 2005, 21(3): 4-11.
- [9] Hughes E A, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, (270): 167-181.
- [10] George F M. Models and realities of reservoir operation[J]. *Water Resources Planning & Management*, 2009, (135): 57-59.
- [11] Williams A, Lansey K, Washburne J. A dynamic simulation based water resources education tool[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 471-482.
- [12] 王好芳, 董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. *人民黄河*, 2004, (6): 7-9.
- [13] 董哲仁. 水库多目标生态调度[J]. *水利水电技术*, 2007, 38(1): 28-32.
- [14] 梅亚东, 翟丽妮, 杨娜. 生态友好型水库调度控泄方案的评价[J]. *武汉大学学报*, 2008, 41(5): 10-13.
- [15] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 325-332.
- [16] 翟丽妮, 梅亚东, 李娜. 水库生态与环境调度研究综述[J]. *人民长江*, 2007, 38(8): 56-60.
- [17] 山西省水利水电勘测设计院. 柏叶口水库初设报告[R]. 太原: 山西省水利水电勘测设计院, 2010.

(上接第 205 页)

4 结论与讨论

通过以上模拟分析可得出如下结论:

1) 沟灌土壤水分入渗湿润锋推进与垄沟参数、土壤性质等有关, 相同入渗量下砂质粘壤土水平向湿润锋推进要快于粘土, 但竖向湿润锋推进速度恰恰相反。

2) 相同灌水量情况下砂质粘壤土灌水停止后水分再分布时间要小于粘土, 但其水平与竖向湿润锋的扩张距离均大于粘土。

3) 设计灌水定额情况下, 砂质粘壤土合理垄宽 20 ~ 50 cm, 粘土合理垄宽为 20 ~ 35 cm, 粘土垄宽小于砂质粘壤土。

参考文献:

- [1] 林同保, 宋雪雷, 孟战赢, 等. 不同灌水量对垄作小麦水分利用及产量和品质的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2007, 41(5): 123-127.
- [2] 边金霞. 春小麦垄作沟灌节水栽培技术[J]. *甘肃科技*, 2008, 24(20): 169-170.
- [3] 王旭清, 王法宏. 小麦垄作栽培技术的肥水效应及光能利用率[J]. *山东农业科学*, 2002, (4): 3-5.
- [4] 邓忠. 固定道耕作结合垄作沟灌对河西走廊春小麦水分利用的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [5] 张永久. 河西绿洲灌区春小麦垄作栽培产量效应及其影响机制的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
- [6] 邓斌. 河西绿洲灌区不同耕作方式下春小麦土壤水分动态变化与产量效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.